

УДК 621.9

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Ю.Г. Гуцаленко, В.И. Полянский, В.В. Ивкин  
Харьков, Украина

## **МЕХАНИКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЗЕРЕН КРУГА**

*Роботу присвячено теоретичному аналізу механіки процесу алмазного шліфування з урахуванням зносу зерен круга для науково обґрунтованого вибору оптимальних умов обробки. Наведено і обговорені аналітичні залежності для визначення продуктивності обробки, які отримані на основі реалізації теоретико-імовірнісного підходу до кінематико-геометричного моделювання шліфування з урахуванням фізики зносу ріжучих зерен круга. Дано деякі практичні рекомендації.*

*Ключові слова:* алмазний круг, ріжучий рельєф, механіка шліфування, товщина зрізу, знос зерна, продуктивність обробки

*Работа посвящена теоретическому анализу механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга для научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки. Приведены и обсуждены аналитические зависимости для определения производительности обработки, полученные на основе реализации теоретико-вероятностного подхода к кинематико-геометрическому моделированию шлифования с учетом физики износа режущих зерен круга. Даны некоторые практические рекомендации.*

*Ключевые слова:* алмазный круг, режущий рельеф, механика шлифования, толщина среза, износ зерна, производительность обработки

*The work is devoted to the theoretical analysis of the mechanics of the diamond grinding process, taking into account the wear of the wheel grains for scientifically based choice of optimal processing conditions. The analytical dependences for definition of processing productivity are presented and discussed on the basis of the probability-theoretic approach to the kinematic-geometric modeling of grinding, taking into account the physics of wear of the wheel cutting grains. Some practical recommendations are given.*

*Keywords:* diamond wheel, cutting relief, grinding mechanics, slice thickness, grain wear, processing productivity

**Введение.** Процесс шлифования характеризуется значительными технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества и точности обрабатываемых поверхностей. В особой мере это относится к алмазному шлифованию, которое, благодаря высокой твердости и остроте режущих кромок круга, позволяет производить эффективную обработку материалов повышенной твердости (твердых сплавов, керамических материалов, высокопрочных сталей и сплавов и т. д.), причем на операциях как окончательной, так и предварительной обработки при съеме значительных припусков [1-3]. При этом в процессе шлифования в связи с износом зерен и связки происходит изменение параметров режущего рельефа алмазного круга.

Для каждого режима шлифования, обрабатываемого материала и характеристики круга существует вполне конкретный режущий рельеф круга, определяемый уровнем энергетического равновесия системы “круг – деталь”. Достижение высоких показателей шлифования обеспечивается в основном поддержанием в процессе обработки оптимального установившегося режущего рельефа [4] эксплуатацией кругов в режиме самозатачивания, а при использовании в кругах прочных металлических связок – в режиме автономной или зонально совмещенной с резанием электрохимической или электроэрозионной правки [5].

В связи с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы аналитической платформы теоретического изучения механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга и научно обоснованного выбора оптимальных условий производительной обработки.

**Механика шлифования с износом зерен круга.** Анализ закономерностей формирования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования проведен на основе расчетной схемы, в которой скорость износа связки равна скорости износа зерен. Для расчетов на рабочей поверхности круга выделен слой зерен  $dn$ , имеющих высоту выступания над связкой  $(b - y_s)$  (рис. 1 [4]), и рассмотрено образование профиля от их наложения на сечение образца, совпадающее с диаметральной плоскостью круга. При взаимном горизонтальном движении  $dn$  зерен и радиальном движении образца на его сечении образуются срезы различной толщины, подчиняющиеся равномерному закону распределения. Относительная полнота профиля элементарного среза от  $dn$  зерен принимает вид:

$$\varepsilon_i(y) = \frac{dn[a_s + 2tgy \cdot (y - y_i)]}{B}, \quad (1)$$

где  $a_s$  – величина площадки износа на зерне, м;  $dn = n \cdot \frac{1}{b} dy_i$ .

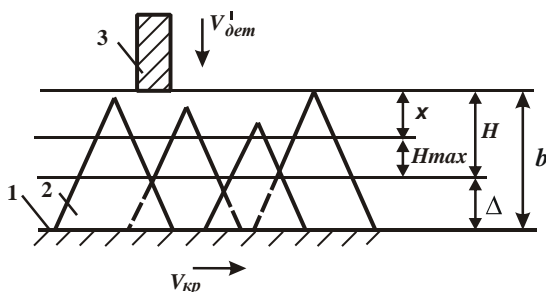


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров процесса шлифования:  
1 – уровень связки; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый образец

Суммарный профиль от таких срезов можно получить вероятностным суммированием, для чего следует перейти от вероятностной функции  $\varepsilon_i(y)$  к противоположной функции  $\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y)$  и воспользоваться теоремой умножения независимых случайных величин, интегрируя выражение  $[a_s + 2tg\gamma \cdot (y - y_a)]$  в пределах от  $y_a$  до  $y$ :

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^{\infty} \Phi_i(y) = e^{-\frac{dn}{B} [a_s(y - y_a) + tg\gamma(y - y_a)^2]}, \quad (2)$$

где  $y_a$  – координата площадки износа на зерне.

Относительную полноту профиля от всех зерен, участвующих в резании, можно получить умножением вероятностной функции  $\Phi(y)$  для всех элементарных слоев зерен, представляя величину  $a_s$  выражением  $a_s = 2tg\gamma(y_a - y_s)$  и заменяя множитель  $(y_a - y_s)$  на  $\eta \cdot (y_a - y_s)$ , где  $\eta = 0 \dots 1$  – безразмерный коэффициент, определяющий величину линейного износа зерна до его объемного разрушения. После несложных преобразований, имеем

$$\Phi_{общ} = e^{-\frac{n \cdot tg\gamma \cdot (1 - \eta^2) \cdot y^3}{b \cdot B \cdot 3}}. \quad (3)$$

Для алмазного шлифовального круга, введенного в обработку полной шириной  $B$  (м) с поверхностной концентрацией зерен  $k$  (шт./м<sup>2</sup>), общее число зерен  $n$  (шт.), участвующих в резании со скоростью круга  $V_{кр}$  (м/с) при движении образца в слое зерен высотой  $b$  (м) со скоростью  $V'_{дем}$  (м/с) по нормали к нему, равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \frac{b}{V'_{дем}}. \quad (4)$$

Максимальная глубина внедрения образца в рабочую поверхность круга, при которой на его сечении образуется полный профиль, т. е. происходит полный съем металла, определяется из условия  $\varepsilon(H) = 0,95$ :

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дем}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}. \quad (5)$$

Или, с вводом

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дем}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (6)$$

$$H = \frac{H_0}{\sqrt[3]{1-\eta^2}}. \quad (7)$$

Как видно, безразмерный коэффициент  $\eta$  зависит от отношения  $x/H_0$ : чем оно больше, тем больше  $\eta$  (рис. 2). Так, при  $x/H_0 < 0,8$  безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значения, близкие  $x/H_0$ , а при  $x/H_0 > 0,8$  – значения, близкие к единице ( $\eta \rightarrow 1$ ). С увеличением отношения  $x/H_0$  значения  $\eta$  приближаются к единице асимптотически. Как следует из рис. 2, условию  $x = H_0$  соответствует значение  $\eta = 0,75$ . Задавая значение  $H_0$  (например,  $H_0 = 1$  мкм), из рис. 2 можно установить взаимосвязь между величинами  $x$  и  $\eta$ . Исходя из зависимости (5), несложно определить параметр  $H$ . Для  $H_0 = 1$  мкм в табл. 1 приведены расчетные значения параметра  $H$ .

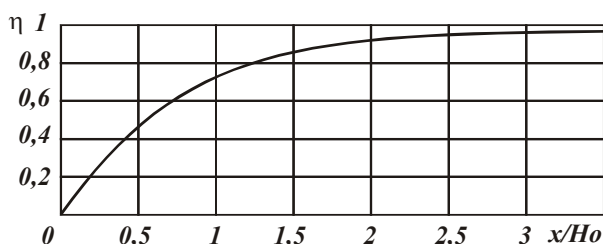


Рисунок 2 – Зависимость величины коэффициента  $\eta$  от отношения  $x/H_0$

Таблица 1 – Расчетные значения параметра  $H$

$x$ , мкм	0	0,25	0,55	0,99	1,55	2,05	3,7	$\infty$
$H$ , мкм	–	1,0	1,1	1,32	1,72	2,16	3,74	$\infty$

С увеличением величины линейного износа зерна  $x$  (при  $H_0 = 1$  мкм), параметр  $H$  увеличивается. Причем, начиная с  $x = 2$  мкм, значения параметров  $x$  и  $H$  примерно равны в связи с ростом износа зерна и, соответственно, асимптотическим приближением безразмерной величины  $\eta$  к единице ( $\eta \rightarrow 1$ ). Зная значения параметров  $x$  и  $H$ , исходя из зависимости  $H_{max} = H - x$  (рис. 2 и табл. 1), несложно определить параметр  $H_{max}$ .

Как следует из рис. 3, с увеличением  $x$  параметр  $H_{max}$  уменьшается. При  $x \rightarrow \infty$  справедливо условие  $H_{max} \rightarrow 0$ . Учитывая ограниченность величины  $x$ , параметр  $H_{max}$  принимает конечные значения.

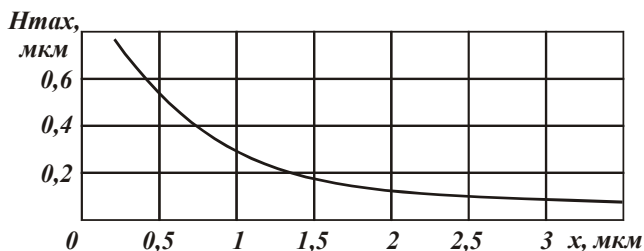


Рисунок 3 – Зависимость максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза  $H_{max}$  от величины линейного износа зерна круга  $x$

Таким образом показано, что величина  $x$  оказывает на максимальную толщину среза  $H_{max}$  значительное влияние, изменяя его практически в неограниченных пределах. Это указывает на то, что при расчете параметра  $H_{max}$ , наряду с традиционными параметрами (режимами шлифования и характеристиками круга), необходимо учитывать величину линейного износа зерен  $x$ . В общем виде параметр  $H_{max}$  определяется:

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = H_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}}. \quad (8)$$

Параметры  $H_{max}$  и  $H_0$  связаны линейной зависимостью, а  $H_{max}$  и  $\eta$  – нелинейной зависимостью. Параметр  $H_{max}$  тем больше, чем больше  $H_0$  и меньше безразмерный коэффициент  $\eta$ . Исходя из зависимости (8), множитель  $\sqrt[3]{(1 - \eta)^2 / (1 + \eta)}$  можно рассматривать в качестве поправочного коэффициента, зависящего от степени затупления режущих зерен. В табл. 2 приведены расчетные значения параметра  $H_{max}$  в зависимости от безразмерного коэффициента  $\eta$  для  $H_0 = 1$  мкм.

Таблица 2 – Расчетные значения параметра  $H_{max}$

$\eta$	0	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,99	1,0
$H_{max}$	–	0,75	0,55	0,33	0,17	0,11	0,04	0

Как видно, с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  параметр  $H_{max}$  уменьшается. При  $\eta \rightarrow 1$  справедливо условие  $H_{max} \rightarrow 0$ . С одной стороны, по мере износа зерен параметр  $H_{max}$  уменьшается, что позволяет улучшить чистоту обработки. С другой стороны, это ведет к прекращению съема материала, так как с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$  параметр  $H_{max} \rightarrow 0$ . В табл. 2 параметр  $H_{max}$  равен множителю  $\sqrt[3]{(1-\eta)^2/(1+\eta)}$ , поскольку  $H_0 = 1$  мкм. Таким образом, множитель  $\sqrt[3]{(1-\eta)^2/(1+\eta)}$ , выполняющий роль поправочного коэффициента в зависимости (8), с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  уменьшается вплоть до нуля. Это указывает на то, что износ зерен, определяемый величинами  $x$  и  $\eta$ , оказывает существенное влияние на закономерности процесса шлифования.

При определении безразмерного коэффициента  $\eta$  следует исходить из условия, что линейный износ круга происходит в результате объемного разрушения зерен, которому обязательно предшествует их поверхностное разрушение [6]. Выпадение зерен из связки первоначально в расчетах не рассматривается. Предельная (разрушающая) нагрузка принимается пропорциональной площади среза  $S_{пред}$ , которая зависит от  $H_{max} = (1-\eta) \cdot H$  и безразмерного коэффициента  $\eta$  (рис. 1):

$$S_{пред} = tg \gamma \cdot H^2 \cdot (1-\eta^2). \quad (9)$$

Разрешая зависимости (5) и (9), имеем

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot tg \gamma \cdot b^2 \cdot V_{дет}^2}}. \quad (10)$$

Как следует из зависимости (10), с увеличением  $V'_{дет}$  безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается и стабилизация режущего рельефа круга происходит на большем удалении от вершины исходного максимально выступающего зерна. Следовательно, прежде чем зерно объемно разрушится, оно претерпевает значительный износ от истирания и микроскалывания кромок. Радиусы округления при вершинах таких зерен увеличиваются, а режущий рельеф круга становится более сглаженным. Полученный результат обусловлен тем, что с увеличением  $V'_{дет}$  предельная площадь среза, соответствующая разрушающей нагрузке, расположена на большем удалении от вершины исходного (неизношенного) зерна. Положение нижней границы

этой предельной площади среза, определенное выше (5), подстановкой (10) определится также следующим образом:

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дет}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} \quad (11)$$

Тогда линейный износ зерна  $x$  и максимальная толщина среза  $H_{\text{max}}$  определяются следующими зависимостями:

$$x = \eta \cdot H = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{дет}}'^2}} \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дет}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}}; \quad (12)$$

$$H_{\text{max}} = (1 - \eta) \cdot H = \left[ \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{дет}}'^2}} \right) \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дет}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} \right] \quad (13)$$

Анализ зависимостей (10), (12) и (13) показывает, что при некотором естественно положительном износе режущих зерен в процессе шлифования ( $0 < \eta < 1$ ), например, в интерпретации выступающей над связкой части зерен конусообразными с прямым углом  $2\gamma$  при вершине ( $\text{tg} \gamma = 1$ ), стабилизация рельефа круга возможна при условии:

$$V'_{\text{дет}} > \frac{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}^{3/2}}{9b} \quad (14)$$

Иначе нагрузки, действующие на зерна, не достигают предельных значений, и разрушение зерен не происходит. Зерна подвергаются, в основном, истиранию и микроскалыванию с образованием площадок износа, вызывая повышенную силовую и тепловую напряженность процесса шлифования и затупление круга. Такая закономерность износа круга имеет место при неправильном выборе характеристики круга, особенно на финишных операциях, когда зерна прочно удерживаются в связке и обновления режущего рельефа новыми кромками не происходит. Полученное решение полностью подтверждается практическими рекомендациями по шлифованию, согласно которым на «мягких» режимах резания эффективно применять круги с пониженной прочностью зерен и связки, обеспечивая режим самозатачивания круга и исключая образование значительных площадок износа на зернах.

Из (10) следует также, что стремление к повышению производительности шлифования регулированием (повышением) только скорости детали и, соответственно,  $V'_{\text{дет}}$ , может приводить к превышению потенциальных возможностей системы физико-геометрических ( $k$ ,  $S_{\text{пред}}$ ,  $b$ ) и

кинематического ( $V_{кр}$ ) определителей состоятельности режущего рельефа круга для выполнения расчетного условия постановки исследуемой модели шлифования  $\varepsilon(y)=0,95$  и, соответственно, осуществления полного съема подводимого в зону резания металла. Не снятый металл в виде гребешков микронеровностей начнет интенсивно контактировать со связкой, разрушая ее, оголяя зерна и уменьшая таким образом прочность удержания их в связке. Критических нагружений сжатия и объемного разрушения зерен в таких условиях, как правило, не происходит из-за преждевременного выпадения зерен из связки (обычно доминирующий вид износа), которому предшествует также изнашивание истиранием и поверхностным микроскалыванием кромок в микрорежущих контактах.

Проведенное обсуждение вокруг условия стабильного шлифования для определяемого скоростью подачи заготовки в зону резания кинематического параметра  $V'_{дет}$  (макроуровень функционирования технической системы алмазно-абразивной обработки) дополним ниже рассмотрением некоторых существеннейших с нашей точки зрения оснований физики микромира высокопроизводительного шлифования.

**Производительность шлифования и стойкость круга.** Принимаем, что рассматриваемые объемное разрушение зерна или его выпадение из связки без разрушения (в зависимости от прочности удержания зерна в связке) происходят от действия некоторых сил резания, имеющих радиальную ( $P_{y1}$ , Н) и тангенциальную ( $P_{z1}$ , Н) составляющие. Исходя из известного физического определения толщины среза  $S_{пред}$  с использованием условного напряжения резания ( $\sigma$ , Н/м<sup>2</sup>) [7]:

$$S_{пред} = P_{z1} / \sigma, \quad (15)$$

или, с использованием коэффициента шлифования  $k_{ш}$ ,

$$k_{ш} = P_{z1} / P_{y1}, \quad (16)$$

имеем:

$$S_{пред} = k_{ш} \cdot P_{y1} / \sigma. \quad (17)$$

С учетом (9) по расчетной схеме рис. 1 и известной связи [4]

$$\sigma = 2\sigma_{сж} / k_{ш}, \quad (18)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>; из (17) относительно  $k_{ш}$  получаем:

$$k_{ш} = (2t g \gamma \cdot (1-\eta)^2 \cdot H^2 \cdot \sigma_{сж} / P_{y1})^{1/2}. \quad (19)$$

Воспользуемся также известной зависимостью [8]:



$$k_{и} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}} \cdot (1 - \eta), \quad (20)$$

где  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м<sup>2</sup>.

Разрешая систему (19) и (20) относительно  $H$ , для состоявшегося внедрения зерна в обрабатываемый материал  $H$  ( $\eta \rightarrow 1$ ), отсчитываемого от условной вершины неизношенного зерна (рис. 1), получаем:

$$H = \sqrt{\frac{P_{y1}}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (21)$$

Как следует из зависимости (21), чем больше твердость обрабатываемого материала  $HV$  и меньше сила  $P_{y1}$ , тем меньше глубина внедрения зерна  $H$ . Следовательно, при шлифовании труднообрабатываемых материалов глубина  $H$  будет небольшой.

Тогда для некоторой характеристики состояния алмазного порошка в связующей матрице рабочей части шлифовального круга, включающей объемную концентрацию ( $m$ , безразмерная величина) и зернистость ( $\bar{X}$ , м), коэффициент

$$(1 - \varepsilon) = H / \bar{X}, \quad (22)$$

определяющий степень выступания зерна над уровнем связки алмазного круга и изменяющийся в пределах 0 ... 1, при условии равенства глубины внедрения зерна в обрабатываемый материал  $H$  максимальной высоте выступания вершин зерен над уровнем связки круга  $b$ ,  $b=H$ , также будет небольшим. Однако из этого не следует уменьшение производительности обработки  $Q$  (м<sup>3</sup>/с), определяемой зависимостью [4], полученной на основе теоретико-вероятностного подхода при шлифовании с учетом площади  $S$  (м<sup>2</sup>) поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали (пластины), движущейся с постоянной скоростью  $V'_{\text{дем}}$  по нормали к рабочей поверхности алмазного круга (рис. 1):

$$Q = (m \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (1 - \varepsilon)^3 \cdot (1 - \eta)^2 \cdot S \cdot V'_{\text{дем}}) / 600\pi. \quad (23)$$

Это связано с одновременным уменьшению максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки круга с  $b=H+\Delta$  (рис. 1) до  $b \approx H$  соответственным уменьшением и безразмерного коэффициент  $\eta$ , как это следует из разрешения (5) относительно  $\eta$  при  $H = b$ :

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V'_{\text{дем}}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^2}}, \quad (24)$$

Согласно (23), уменьшение  $\eta$  позволяет несколько компенсировать снижение производительности обработки  $Q$  с уменьшением безразмерного коэффициента  $(1-\varepsilon)$ .

Известно и теоретически обосновано [4], что основным условием повышения производительности обработки  $Q$  при шлифовании материалов высокой твердости является поддержание на алмазном круге "острого" режущего рельефа ( $\eta \rightarrow 0$ ). Это достигается работой алмазного круга в режиме самозатачивания путем применения относительно малопрочных органических или керамических связей, или работой алмазного круга на прочных металлических связках в режиме его непрерывной правки автономно зоне резания или непосредственно в ней электрохимическим (например, опыт [9]) или электроэрозионным (например, опыт [10]) путем.

Известно, что с увеличением зернистости  $\bar{X}$  алмазного круга прочность зерна на раздавливание (определяемая разрушающей нагрузкой  $P_1$ , Н) увеличивается по эмпирической зависимости

$$P_1 = \alpha \cdot \bar{X}^\beta, \quad (25)$$

где  $\alpha$  и  $\beta < 1$  – постоянные [4]. Тогда коэффициент  $(1-\varepsilon)$  (22) с учетом зависимости (21) определится как:

$$(1-\varepsilon) = \frac{1}{\bar{X}^{(1-0,5\beta)}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (26)$$

Из (26) следует, что коэффициент  $(1-\varepsilon)$  тем больше, чем меньше зернистость круга  $\bar{X}$  и больше параметр  $\alpha$ , который определяет относительную прочность зерен различных марок алмазов. Следовательно, добиться повышения производительности обработки  $Q$  при обработке материалов более высокой твердости, согласно зависимости (23), можно за счет применения мелкозернистых алмазных кругов с повышенной прочностью алмазных зерен. С учетом того, что параметры  $\bar{X}$  и  $HV$  входят в зависимость (26) примерно с одинаковой степенью, при этом зернистость алмазного круга следует изменять (понижать) обратно пропорционально изменению (повышению) твердости обрабатываемого материала.

Уменьшение зернистости круга  $\bar{X}$ , согласно зависимости (26), приводит к увеличению коэффициента  $(1-\varepsilon)$ , т. е. повышению степени выступления зерна над уровнем связки круга и уменьшению части зерна, расположенной в связке круга. Поэтому прочность удержания зерна уменьшится, и для ее увеличения необходимо использовать более прочные металлические связки алмазного круга.

Стойкость алмазных кругов определяется диапазоном изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ . Чем больше значения  $\eta$  в пределах физического существования в режущем контакте ( $0 < \eta < 1$ ), тем выше

стойкость круга. Задача увеличения значения  $\eta$  связана с увеличением параметра  $H$ , согласно зависимости (5), и коэффициента  $(1-\varepsilon)$  – согласно зависимости (22). Следовательно, увеличить стойкость алмазного круга можно за счет увеличения высоты выступания зерен над уровнем связки, применения более прочных металлических связок и методов с попутным обработке целевым вскрытием алмазного слоя круга, например, электроэрозионной правки.

В общем случае для более правильного представления о технологических возможностях алмазного шлифования параметр  $b$  следует рассматривать в виде суммы двух слагаемых (рис. 1):  $b = H + \Delta$ , где  $\Delta$  – высота межзеренного пространства круга, занимаемая стружками и другими продуктами обработки; в принятой [4, 11] систематике:  $\Delta = \xi \cdot \Delta_0$ ;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ( $\xi > 1$ );  $\Delta_0$  – толщина условного слоя "расплавленного" обрабатываемого материала, который образуется за одно вращение круга, м.

Для круглого продольного шлифования с глубиной  $t$  (м) справедливы соотношения [4]:

$$A_0 = \frac{S_{\text{мгн}}}{B} = \frac{Q}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{V_{\text{дем}} \cdot t}{V_{\text{кр}}} \quad (27)$$

где  $S_{\text{мгн}} = Q/V_{\text{кр}}$  – мгновенная суммарная площадь среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;  $V_{\text{дем}}$  – окружная скорость заготовки, м/с.

Из совместного рассмотрения расчетной схемы по рис. 1, (22) и (23) очевидно, что чем меньше параметр  $\Delta$ , тем больше резерв повышения  $H$  и, соответственно, производительности обработки  $Q$  при шлифовании. Следовательно, в идеале необходимо стремиться к выполнению двух условий:  $\xi \rightarrow 1$ ;  $b \approx H$ .

По данным проведенных теоретических исследований [4, 11] для обычного алмазного шлифования твердосплавных деталей коэффициент  $\xi$  изменяется от 100 до 1 000 и более. Поэтому его уменьшение, например в 10 раз, позволит во столько же раз повысить производительность обработки. При алмазном шлифовании различных сталей, титановых сплавов и других относительно пластичных материалов, коэффициент  $\xi$  еще больше, и эффект обработки от уменьшения  $\xi$  для таких материалов может быть еще выше. Добиться существенного уменьшения коэффициента  $\xi$  можно путем применения различных методов вибрационного и ультразвукового дробления стружки, повышающих компактность ее размещения на рабочей поверхности алмазного круга.

Значительно большими технологическими возможностями в ряду других комбинированных методов шлифования, обеспечивающих растворение,

оплавление или сгорание стружки в зоне резания, располагает алмазное электроэрозионное шлифование [4], или алмазно-искровое шлифование в терминологической практике университета-разработчика [12]. При оптимальных условиях алмазного электроэрозионного шлифования коэффициент  $\zeta$  можно уменьшить до  $\zeta \approx 1$  и превратить режущий рельеф алмазного круга в полностью активно работающий, у которого полный сьем (срез) подводимого в зону резания обрабатываемого металла производится на уровне связи круга.

Таким образом, при правильном назначении механических и электрических режимов алмазного электроэрозионного шлифования, благодаря управляющему воздействию энергии электрических разрядов на связку алмазного круга и стружку, обеспечивается развитый режущий рельеф и высокая стойкость алмазного круга при максимальной реализации его потенциальных возможностей.

С учетом сказанного, важно провести анализ круглого наружного алмазного шлифования для условий:  $\zeta \rightarrow 1$ ;  $b \approx H$ , которые можно реализовать благодаря методологии алмазного электроэрозионного шлифования в математической интерпретации [4] и ее адаптации к реальной практике [10, 11]. Из практических соображений трансформируем зависимости для  $H$ ,  $\eta$ ,  $Q$  вводом в них режимных параметров  $V_{\text{дем}}$  и  $t$  в явном виде через эквивалентную замену [13]:

$$V'_{\text{дем}} = V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}, \quad (28)$$

где  $\rho = 1/R_{\text{кр}} + 1/R_{\text{дем}}$ ;  $R_{\text{кр}}$ ,  $R_{\text{дем}}$  – радиусы круга и детали, м.

С использованием (28) и (9) из (11) получаем:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot (1 - \eta^2)}}; \quad (29)$$

С использованием (28) из (24) получаем:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V_{\text{дем}} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^2}}; \quad (30)$$

Чисто режимное описание расчетной производительности в идеально жесткой технической системе круглого наружного шлифования,

$$Q = S_0 \cdot V_{\text{дем}} \cdot t, \quad (31)$$

где  $S_0$  – продольная подача заготовки, м/об., с позиций углубленного анализа в контексте рассматриваемой модели процесса дополним здесь выражением с представлением  $t$  в (31) из (30); получаем:

$$Q = \frac{S_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр}^2 \cdot (1 - \eta^2)^2}{162 \cdot V_{дет} \cdot \rho}. \quad (32)$$

Как следует из (32), добиться увеличения производительности обработки  $Q$  можно путем уменьшения безразмерного коэффициента  $\eta$  в соответствии с зависимостью (30), реализуя режим самозатачивания алмазного круга на органической или керамической связках, или режим электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке. Очевидно, подход с выбором оптимальной связки, обеспечивающей работу алмазного круга в режиме самозатачивания с выполнением условия  $b \approx H$ , более универсален.

Важным условием повышения производительности при шлифовании труднообрабатываемых материалов следует также рассматривать поддержание необходимого уровня  $\eta$  одновременным уменьшением скорости детали  $V_{дет}$  и превосходящим это уменьшение увеличением продольной подачи  $S_0$ , что с очевидностью прослеживается по зависимости, полученной подстановкой выражения  $t$  из (31) в (30):

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot \sqrt{2 \cdot V_{дет} \cdot Q \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2 \cdot \sqrt{S_0}}}. \quad (33)$$

Естественной верхней границей максимального использования возможностей по подаче на оборот  $S_0$  для получения производительных преимуществ в условиях небольших скоростей заготовки является ширина алмазосодержащей рабочей ленты на периферии шлифовального круга. С учетом этого разработан высокопроизводительный процесс продольного круглого наружного алмазного шлифования быстрорежущих и твердосплавных многолезвийных инструментов (фрез, разверток, зенкеров и т. д.) [14]. В отличие от существующих процессов шлифования, где продольная подача на оборот заготовки  $S_0$  не превышает  $0,1B$ , а скорость вращения заготовки  $V_{дет}$  составляет 20 ... 30 м/мин, осуществлять шлифование предложено со съемом припуска до 1,2 мм на сторону за один проход,  $S_0 = 0,9B$  и  $V_{дет} = 1,5$  м/мин, что позволило при экономически приемлемых затратах на расход алмазного материала в 1,5 ... 2 раза повысить производительность обработки  $Q$ .

Эффективность применения этого технологического решения алмазного шлифования изделий из высокотвердых труднообрабатываемых материалов стала возможной благодаря специально разработанным принципам назначения параметров режима резания [11], согласно которым для любого рельефа круга независимо от зернистости и концентрации алмазных зерен существует допустимая (прочностная) толщина среза максимально выступающим зерном  $H_{max}$ , при достижении которой удельный расход алмаза принимает минимальное значение, и поэтому поиск оптимальных режимов

шлифования следует производить из условия обеспечения полного съема металла на уровне достижения  $H_{max}$ , расчетно-экспериментальное выявление которой предопределяет успех оптимизации.

Из рисунка 1, принимая во внимание  $\eta = x/H$  и используя (29), определяя  $t$  из (31), в первом приближении исходя также из  $(1-\eta) \approx 1$  и тем более  $(1-\eta^2) \approx 1$  при весьма малых  $\eta$  для поддерживаемого острым режущего рельефа, получаем математическую зависимость для определения  $H_{max}$  в задачах практического технологического анализа

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{\frac{2 \cdot \rho \cdot V_{дет} \cdot Q}{B}}, \quad (34)$$

Как это показано выше, получение производительных преимуществ в шлифовании материалов высокой твердости, характеризующемся небольшим значением максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки алмазного круга  $b$ , уменьшением скорости детали  $V_{дет}$  и увеличением  $S_0$  до  $S_0 \approx B$  при сохранении значения  $\eta$ , предполагает также существенное увеличение глубины шлифования  $t$ . Очевидно, что наибольший эффект в реализации ресурса повышения производительности операций шлифования увеличением его глубины достигается при условии  $t = R_{дет}$ . Реализовать это условие можно при прорезке глубоких пазов, шлифовании глубоких канавок, разрезке материалов отрезными кругами, а также при плоском шлифовании торцовым кругом с вращающимся столом станка, рассматривая в качестве ширины шлифования параметр  $t = R_{дет}$ , а в качестве глубины шлифования – параметр  $S_0$ , которые входят в зависимость (31).

Следует также заметить, что указанное выше необходимое условие стабилизации выходных показателей шлифования (14), вкупе с оговоренной там же необходимой умеренностью в соблюдении заключенного этим условием превышения определяющей производительность обработки скорости подачи заготовки в зону резания  $V'_{дет}$  над числовой характеристикой параметрического комплекса с параметрами  $k$ ,  $V_{кр}$ ,  $S_{пред}$  в числителе и  $b$  – в знаменателе, в интересах реализации процессов повышенной устойчивой производительности стимулирует применение алмазных кругов из сверхтвердых зерен повышенной концентрации (повышая  $k$ ) и, особенно, прочности в связках с повышенным алмазоудержанием (повышая  $S_{пред}$ ), разработку высокоскоростных техники и технологий (повышая  $V_{кр}$ ), а также совершенствование очистки зоны резания от продуктов обработки в направлении интенсификации эвакуации из нее его твердых продуктов, тем самым позволяя минимизировать параметр  $\Delta$  и, соответственно,  $b$ . Как известно, компетентная реализация метода алмазно-искрового шлифования превосходно способствует этому [10].

В реальной практике и совершенствовании моделей шлифования важно также учитывать, что изменение скоростей  $V'_{дет}$  и  $V_{кр}$ , особенно значительное повышение, существенно изменяет теплофизические и динамические условия шлифовального контакта, что влияет на физико-механические свойства и поведение связки инструмента и алмазных зерен, физико-механическую картину срезов последними и их изнашивания. Поэтому пропорциональное увеличению  $V_{кр}$  увеличению  $V'_{дет}$  без учета обратных связей на возможности по  $S_{пред}$  и  $b$  в общем случае отнюдь не гарантирует сохранение того же по условию (14) уровня возможности реализации стабилизированного шлифования, в том числе по  $\eta$  и  $H_{max}$ .

**Закключение.** Рассмотрение вероятностной кинематико-геометрической модели установившегося режущего рельефа круга с учетом физики износа его режущих зерен применительно к механике шлифования позволило получить аналитические взаимосвязи параметров влияния на износ режущих зерен и максимальную толщину среза.

Приведены аналитические зависимости для определения основных параметров и производительности шлифования в результате действия на режущие зерна предельных нагрузок, вызывающих их объемное разрушение и последующее выпадение из связки круга. Показано, что добиться увеличения производительности обработки можно главным образом за счет уменьшения величины линейного износа зерен до момента их объемного разрушения. Это достигается работой круга в режиме интенсивного самозатачивания или с применением эффективных методов правки.

Полученные теоретические результаты повышают уровень взаимного соответствия теории и практики шлифования, апробированы в разработках и применениях устойчивых процессов высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки, в особенности с электрофизической стимуляцией процессов в зоне резания.

Практика реализаций результатов выполненного теоретического исследования развивает опыт разработки техники, инструмента и технологий алмазно-искрового шлифования в харьковской научной школе физики процессов резания и свидетельствует о перспективности дальнейших исследований в этом направлении.

Результаты выполненных исследований позволяют осуществлять теоретический анализ механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга для научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки и рекомендуются к использованию на машиностроительных предприятиях при проектировании и реализации высокопроизводительных технологических процессов шлифования, в особенности изделий из труднообрабатываемых материалов с применением алмазных кругов на металлических связках.

**Список использованных источников:** 1. Захаренко, И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – Киев : Наук. думка, 1981. – 300 с. 2. Инструменты из сверхтвердых материалов : [Справочник] / Под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с. 3. Лавриненко, В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти т. Т. 1 : Механика резания материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Грабченко, А. И. Інтегровані процеси обробки матеріалів різанням : підручник / А. І. Грабченко, В. О. Залоза, Ю. М. Внуков і др.; під заг. ред. А. І. Грабченка і В. О. Залози. – Суми : Університетська книга, 2017. – 451 с. – Рос. мовою. 6. Мишинаевский, Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Л. Л. Мишинаевский. – Киев : Наук. думка, 1982. – 192 с. 7. Маслов, Е. Н. Основные закономерности высокопроизводительного шлифования / Е. Н. Маслов. – В кн. : Высокопроизводительное шлифование. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – С. 3-17. 8. Якимов, О. В. Високоефективне шліфування : навч. посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, О. О. Якимов. – Київ : ІСДО, 1995. – 180 с. 9. Грабченко, А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с. 10. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазно-искровое шлифование материалов высокой функциональности : монография [Электронный ресурс] / Ю. Г. Гуцаленко. – 2-е вид., перераб. и допов. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХПИ», 2017. – 289 с. [3,37 Мб] – Рос. мовою. – <http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>. 11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти т. Т. 9 : Проектирование технологических процессов в машиностроении. – Одесса : ОНПУ, 2005. – 584 с. 12. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазно-искровое шлифование : обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Гуцаленко, Ю. Г. // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 13. Якимов, А. В. Теоретические основы резания и шлифования материалов : учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с. 14. Новиков, Ф. В. Оптимальные решения в металлообработке : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепр : Лира, 2017. – 476 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zaharenko, I. P. Osnovy almaznoj obrabotki tverdosplavnogo instrumenta. Kiev, Naukova dumka, 1981, 300 p. Print. 2. Instrumenty iz sverhtvorydykh materialov. Ed. by N. V. Novikov and S. A. Klimenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 608 p. Print. 3. Lavrinenko, V. I., and V. Yu. Solod. Instrumenty iz sverhtvorydykh materialov v tekhnologiyah abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki. Kamenskoe, DGTU, 2016, 529 p. Print. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 1: Mekhanika rezaniya materialov. Odessa, ONPU, 2002, 580 p. Print. 5. Grabchenko, A. I., et al. Integrovani procesi obrobki materialiv rizannvam. Ed. by A. I. Grabchenko and V. O. Zalozha. Sumi, Universitets'ka kniga, 2017, 451 p., in Russian. Print. 6. Mishnaevskij, L. L. Iznos shlifoval'nykh krugov. Kiev, Naukova dumka, 1982, 192 p. Print. 7. Maslov, E. N. "Osnovnye zakonomernosti vysokoproizvoditel'nogo shlifovaniya". In book: Vysokoproizvoditel'noe shlifovanie. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1962, 3-17. Print. 8. Yakimov, O. V., et al. Visokoproduktivne shlifuvannya. Kiiv, ISDO, 1995, 180 p. Print. 9. Grabchenko, A. I. Rasshirenie tekhnologicheskikh vozmozhnostej almaznogo shlifovaniya. Kharkov, Vishcha shkola, 1985, 184 p. Print. 10. Gutsalenko, Yu. G. Almazno-iskrove shlifuvannya materialiv visokoї funkcional'nosti. Kharkov, Kursor, NTU «KhPI», 2017, Web, 289 p., 3.37 Mb, in Russian, <<http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>>. 11. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 9: Proektirovanie tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. Odessa, ONPU, 2005, 584 p. Print. 12. Gutsalenko, Yu. G. "Almazno-iskrovoe shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezaniya". Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii v narodnom hozyajstve: Tr. 18-j mezhduhar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012. Kharkov, GP HMZ "FED", 2012, 79-88. Print. 13. Yakimov, A. V., et al. Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov. Odessa, OSPU, 1999, 450 p. Print. 14. Novikov, F. V., V. A. Zhovtobryuh, and G. V. Novikov. Optimal'nye resheniya v metalloobrabotke. Dnepr, Lira, 2017, 476 p. Print.